

不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究

孙汉印¹, 姬强¹, 王勇¹, 王旭东^{1,2*}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过田间试验研究了不同秸秆还田模式条件下土壤团聚体分布、水稳性团聚体有机碳的含量及其氧化稳定性。结果显示:不同秸秆方式对各级别团聚体影响有差异,秸秆还田降低了微团聚体(<53 μm)的含量,增加了大团聚体(>2 000 μm)和中微团聚体(250~53 μm)的含量;在不同的还田模式下,总体看来小麦秸秆高留茬还田、玉米秸秆粉碎旋耕直接还田或覆盖还田对团聚体的分布影响较大。短时期内不同秸秆还田处理对团聚体稳定性影响较小。在小麦秸秆粉碎旋耕直接还田条件下,玉米秸秆粉碎旋耕直接还田更有利于大级别团聚体(>250 μm)中有机碳的增加;在小麦秸秆不还田情况下,玉米秸秆粉碎旋耕直接还田或覆盖深松还田则有利于小级别团聚体中有机碳的提高。秸秆还田提高了较大团聚体(>2 000 μm 和250~2 000 μm)有机碳的氧化稳定性。降低了较小团聚体(<53 μm)有机碳的氧化稳定性。在同一小麦秸秆还田模式下,玉米秸秆粉碎旋耕直接还田有利于较大团聚体氧化稳定性的提高。相关分析表明:团聚体的平均几何直径(GMD)与250~53 μm 团聚体的有机碳含量和<53 μm 级别团聚体数量关系最密切。

关键词:秸秆还田;水稳性团聚体;有机碳;氧化稳定性

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)02-0369-08

The Distribution of Water-stable Aggregate-associated Organic Carbon and Its Oxidation Stability Under Different Straw Returning Modes

SUN Han-yin¹, JI Qiang¹, WANG Yong¹, WANG Xu-dong^{1,2*}

(1.College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: Field experiment was conducted to study the distribution and amount of water stable aggregate-associated organic carbon as well as its oxidation stability. The results indicated that straw returning reduced the amount of micro-aggregates (<53 μm) and increased the amount of macro-aggregates (>2 000 μm) and intermediate aggregate (250~53 μm); Overall, high wheat straw stubble returning, maize straw pulverization returning or mulching returning affected the distribution of aggregates significantly. Aggregates stability varied slightly among different straw returning modes in a short-term field experiment. Maize straw pulverization returning plus rotary tillage was more likely to increase the accumulation of macro-aggregate (>250 μm) associated organic carbon when wheat straw was pulverized and returned to soil directly. When no wheat straw was returned, maize straw pulverization returning and mulching returning both benefited the accumulation of micro-aggregate associated organic carbon. Straw returning increased the oxidation stability of organic carbon in comparatively large aggregate (>2 000 μm and 250~2 000 μm) and decreased the oxidation stability in small aggregate (<53 μm). Generally, under the same wheat straw returning modes, maize straw pulverization returning was in favor of the increase of the oxidation stability of organic carbon in comparatively large aggregate. Correlation analysis indicated that organic carbon of 250~53 μm aggregate and amount of <53 μm aggregate were two soil variables most closely related to soil aggregate geometric mean diameter (GMD).

Keywords: straw returning; water stable aggregate; soil organic carbon; oxidation stability

收稿日期:2011-07-09

基金项目:国家科技支撑项目(2007BAD89B16,2012BAD14B11);中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX1-YW-07)

作者简介:孙汉印(1986—),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为土壤与环境化学。E-mail:shyrcy@126.com

* 通讯作者:王旭东 E-mail:wangxudong01@126.com

土壤有机碳库是陆地碳库的核心组成部分,也是全球碳循环的重要组成部分。随着农业土地利用的集约化程度不断加强,土壤结构退化成为土壤退化最重要的过程之一,其中最重要的是土壤有机碳含量的减少和团聚体稳定性的下降^[1]。团聚体作为土壤结构的重要组成部分,土壤团聚状况和土壤有机碳含量可作为评价土壤肥力的综合指标^[1],并且在土壤功能维持中有着重要作用,如影响土壤水热传输、土壤养分保持、土壤养分供应和转化、土壤侵蚀能力以及根系的穿透和发育等^[2],长期以来受到科研工作者的极大关注^[3]。土壤有机碳对团聚体结构有重要影响,土壤有机碳库储量与水稳性团聚体密切相关,有机碳含量随着团聚体粒径的增大而增加,且大团聚体比微团聚体含有更多初期不稳定的新成有机物质^[4]。氧化稳定性是土壤有机质(碳)的一个重要性质,与有机质(碳)抵抗氧化的能力有关,关系到有机质(碳)分解的难易^[5],影响土壤肥力的发挥^[6]。袁可能提出用氧化稳定系数(K_{os})来衡量土壤的氧化稳定性, K_{os} 值越大,氧化稳定性越大,反之则越小^[7]。目前针对土壤有机碳氧化稳定性的研究主要集中在施肥、耕作措施方面^[2,5,8-9]。已有很多针对施肥、土地利用方式改变以及耕作措施对土壤团聚体碳的含量和分布影响的研究^[1,10-12]。秸秆还田固碳潜力较大,可以在提高土壤有机碳含量的同时促进土壤植物营养元素的再循环^[13]。关中平原作为中国重要的粮食产区,秸秆还田作为一种保护性耕作措施,近 20 年在该地区得到推广。但是不同秸秆还田

模式对土壤有机碳在团聚体水平上的影响以及其固碳机制的研究还不够清楚,需要进一步研究。所以本文以不同秸秆还田模式田间试验为材料,通过研究不同秸秆还田模式下团聚体分布、各级别团聚体有机碳及其氧化稳定性,以期对土壤有机碳的固定和土壤结构调控提供理论,为当地最佳秸秆还田模式的筛选提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

不同秸秆还田模式田间定位试验位于陕西关中平原中部三原县的西北农林科技大学试验农场,属暖温带大陆性季风气候区,年平均降雨量为 517.7 mm,平均温度为 13.4 ℃,属于典型的冬小麦-夏玉米一年两熟种植区。土壤为壤土(土垫旱耕人为土)。不同秸秆还田模式试验设计的主处理为小麦秸秆高留茬覆盖还田、小麦秸秆粉碎旋耕直接还田,小麦秸秆不还田 3 种类型,在小麦秸秆 3 种还田模式下,进行了玉米秸秆的 3 种还田模式(粉碎覆盖深松还田、粉碎旋耕直接还田、不还田)试验,共 9 种处理模式。小区面积 10 000 m²,具体处理见表 1。试验开始于 2008 年 6 月,试验前土壤的理化性质见表 2。

1.2 土壤采集与分析

2010 年 6 月在小麦收获后于田间每个小区(共 9 个小区处理),在 0~20 cm 土层以“S”型取 5 点混合而成 1 个混合土样,每个小区取 3 个混合土样。样品在

表 1 不同秸秆还田模式试验处理

Table 1 Straw return treatments

处理	秸秆还田与耕作模式
1 WslMp	小麦秸秆高留茬覆盖还田(玉米生长期)+玉米秸秆粉碎旋耕直接还田(小麦生长期)
2 WslMm	小麦秸秆高留茬覆盖还田(玉米生长期)+玉米秸秆粉碎覆盖深松还田(小麦生长期)
3 WslMn	小麦秸秆高留茬覆盖还田(玉米生长期)+玉米秸秆不还田(小麦生长期)
4 WplMn	小麦秸秆粉碎旋耕直接还田(玉米生长期)+玉米秸秆不还田(小麦生长期)
5 WplMm	小麦秸秆粉碎旋耕直接还田(玉米生长期)+玉米秸秆粉碎覆盖深松还田(小麦生长期)
6 WplMp	小麦秸秆粉碎旋耕直接还田(玉米生长期)+玉米秸秆粉碎旋耕直接还田(小麦生长期)
7 WnlMp	小麦秸秆不还田(玉米生长期)+玉米秸秆粉碎旋耕直接还田(小麦生长期)
8 WnlMm	小麦秸秆不还田(玉米生长期)+玉米秸秆粉碎覆盖深松还田(小麦生长期)
9 WnlMn	小麦秸秆不还田(玉米生长期)+玉米秸秆不还田(小麦生长期)

表 2 供试土壤基本理化性状(0~20 cm)

Table 2 Basic physical and chemical properties of tested soil(0~20 cm)

全氮/g·kg ⁻¹ Total N	硝态氮/g·kg ⁻¹ NO ₃ -N	铵态氮/g·kg ⁻¹ Available N	速效磷/g·kg ⁻¹ Available P	速效钾/g·kg ⁻¹ Available K	有机碳/g·kg ⁻¹ Organic carbon
0.68	13.87	12.92	52.64	122.82	9.30

风干之前过 8 mm 筛,去除杂草和植物根系,土样带回实验室风干,备用。

采用 Elliot^[14]提供的方法分离 4 个级别水稳性团聚体,即>2 000 μm ,2 000~250 μm ,250~53 μm 和<53 μm 4 个级别。>250 μm 的团聚体称为水稳性大团聚体,<250 μm 称为水稳性微团聚体。各团聚体总有机碳采用重铬酸钾氧化法测定,易氧化碳通过袁可能法^[17]测定;土壤基本理化性质均采用常规分析方法。

氧化稳定系数(K_{os})=难氧化碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)/易氧化碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$);其中,难氧化碳含量=总有机碳-易氧化碳。

在玉米种植过程中小麦秸秆还田量约为 7 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;N 用量为 187.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (播前 67.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 做底肥,苗期追施 75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,喇叭口期追施 45 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); P_2O_5 用量为 110 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,作为底肥一次性施入。在小麦种植过程中玉米秸秆采用全量还田,还田量约为 8 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;N 用量为 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, P_2O_5 用量为 110 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,均作为底肥一次性施入。

1.3 数据处理与统计检验

试验结果通过 SPSS 18.0 进行单因素方差分析和相关分析。多重比较选择 Duncan 极值法,显著性水平为 5%。供试土壤各级别团聚体的质量百分含量以及各级别团聚体对土壤有机碳的贡献率分别采用式(1)和式(2):

各级别团聚体质量百分含量=该级别团聚体质量/土壤样品总质量 $\times 100\%$ (1)

团聚体对土壤有机碳的贡献率=团聚体有机碳含量 $\times$ 团聚体的质量百分含量/耕层土壤中有机碳含量 $\times 100\%$ (2)

土壤团聚体的几何平均直径用下述公式计算:

团聚体几何平均直径(GMD)= $\exp[\sum (W_i \times \lg X_i / W_s)]$

式中: W_i 为某一级别水稳性团聚体质量; X_i 为某一级别团聚体平均直径; W_s 为分析样品的质量(100 g)。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田模式对团聚体含量的影响

在关中平原的塿土区,土壤团聚体含量随着级别的减小逐渐增多(见表 3),以<53 μm 级别团聚体含量最多(占 42.16%),>2 000 μm 级别团聚体最少(仅占 4.74%);土壤总体以微团聚体为主(75.88%),大团聚体含量相对较少(24.12%)。与对照相比(处理 9,玉米和小麦秸秆均不还田),除了处理 3 外,各处

表 3 耕层土壤团聚体的含量(%)

Table 3 The percentage of mass of soil aggregates in different grades in plough layer(%)

处理 Treatments	各级团聚体质量百分量/% The percentage of mass of aggregates in different grades/%			
	>2 000 μm	2 000~250 μm	250~53 μm	<53 μm
1 WslMp	9.51a	17.60a	37.19ab	35.69c
2 WslMm	4.37b	16.44a	40.85a	38.35bc
3 WslMn	3.25c	21.35a	40.94a	34.46c
4 WplMn	3.92bc	17.78a	37.14ab	41.16abc
5 WplMm	3.97bc	19.93a	31.58bc	44.52abc
6 WplMp	4.20bc	20.26a	29.56c	45.98ab
7 WnlMp	4.21bc	21.60a	29.55c	44.65abc
8 WnlMm	5.61bc	18.15a	31.66bc	44.58abc
9 WnlMn	3.62bc	21.33a	25.04c	50.02a
平均	4.74	19.38	33.72	42.16

注:同列数据后标不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Values with different small letters with in the same line have significant difference($P<0.05$). The same as below.

理>2 000 μm 级别团聚体的含量都有所增加,其中处理 1 最高,差异达显著水平。对于直径>2 000 μm 的团聚体,当夏季小麦秸秆高留茬还田(处理 1、2、3)时,秋季玉米秸秆还田提高该级别团聚体的含量,与玉米秸秆不还田相比,玉米秸秆粉碎旋耕直接还田增加 192.6%,玉米秸秆覆盖深松还田增加 34.5%;当夏季小麦粉碎旋耕直接还田(处理 4、5、6)时,秋季无论是玉米秸秆粉碎旋耕直接还田、还是覆盖深松还田,虽然都增加了>2 000 μm 级别团聚体含量趋势,但与玉米秸秆不还田相比,差异不显著;当夏季小麦秸秆不还田时(处理 7、8、9),同样,秋季无论是玉米秸秆粉碎旋耕直接还田、还是覆盖深松还田,对>2 000 μm 级别团聚体的含量影响不显著。对于 2 000~250 μm 直径的团聚体,总体看来,小麦、玉米秸秆还田对该级别团聚体影响较小,就同一小麦秸秆还田条件下,都以玉米秸秆粉碎旋耕直接还田处理稍大于覆盖深松还田处理。对于 250~53 μm 级别团聚体,和对照相比,该级别团聚体含量在各秸秆处理都有所提高,其中以处理 1、2、3、4 提高幅度较大,差异达显著水平。对于直径<53 μm 级别团聚体,所有处理的含量都低于对照(处理 9),其中在小麦高留茬还田时,各玉米还田处理显著低于对照。

可见,不同秸秆方式对各级别团聚体影响有差异,秸秆还田降低了微团聚体(<53 μm)的含量,增加了大团聚体(>2 000 μm)和中微团聚体(250~53 μm)

的含量;在不同的还田模式下,总体看来小麦秸秆高留茬还田、玉米秸秆粉碎旋耕直接还田或覆盖深松还田对团聚体的分布影响较大。

2.2 不同秸秆还田模式对土壤团聚体稳定性的影响

几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体稳定性的重要指标。大量研究表明 GMD 能更好地反应土壤团聚体和水稳性团聚体的分布和稳定特征^[1]。由图 1 可以看出,秸秆还田有利于土壤团聚体稳定性的提高。相对于对照(处理 9),各处理相比对照均有所提高,其中以处理 1 为最高(0.48 mm),比对照的平均几何直径提高了 11.6%,但是差异不显著。可见,在较短试验期内(2 a),不同秸秆还田模式对土壤团聚体的分布虽有影响,但是对团聚体稳定性的影响还达不到显著水平。

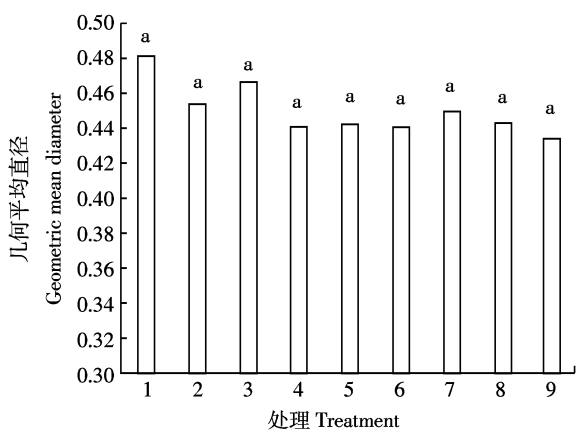


图 1 不同秸秆还田模式对团聚体几何平均直径的影响
Figure 1 Geometric mean diameter(GMD) under different straw returning modes

2.3 不同秸秆还田模式对团聚体中有机碳含量的影响

从表 4 可以看出,各团聚体有机碳整体以 2 000~250 μm 级别团聚体含碳量最高,<53 μm 级别团聚体有机碳最低。相对于对照(处理 9),对于>2 000 μm 级别的团聚体,大部分秸秆还田处理提高了该级别团聚体有机碳含量(处理 1 除外),增加幅度为 9.5%~27.7%,其中以处理 5(小麦秸秆粉碎旋耕直接还田+玉米秸秆粉碎覆盖深松还田)和处理 6(小麦秸秆粉碎旋耕直接还田+玉米秸秆粉碎旋耕直接还田)的碳含量增加相对较多,差异达显著水平;对于 2 000~250 μm 级别团聚体,多数秸秆还田处理也不同程度地提高了该级别团聚体有机碳含量(处理 1 和处理 3 除外),增加幅度为 5.1%~15.4%,其中以处理 6(小麦秸秆粉碎旋耕直接还田+玉米秸秆粉碎旋耕直接还田)的碳含量最高。对于 250~53 μm 级别团聚体,秸

秆还田处理大部分对该级别团聚体的有机碳含量提高不显著,处理 1 和处理 3 甚至有显著降低;对于<53 μm 级别团聚体,处理 1、6 使该级别团聚体有机碳降低,而处理 4、5、7、8 则使有机碳增加。因此,在小麦秸秆粉碎旋耕直接还田条件下,玉米秸秆粉碎旋耕直接还田更有利于大级别团聚体(>250 μm)中有机碳的增加;在小麦秸秆不还田情况下,玉米秸秆粉碎旋耕直接还田或覆盖深松还田则有利于小级别团聚体中有机碳含量的提高。

表 4 不同级别团聚体中有机碳含量(g·kg⁻¹)
Table 4 Contents of organic carbon in water stable aggregates different in size(g·kg⁻¹)

处理 Treatment	大团聚体 Macro-aggregate >2 000 μm	2 000~250 μm	微团聚体 Micro-aggregate 250~53 μm	<53 μm
1 WslMp	11.92d	13.65bc	8.78d	4.83cd
2 WslMm	14.04abc	14.53ab	9.17cd	5.40bcd
3 WslMn	13.51bcd	12.77c	8.52d	5.91ab
4 WplMn	14.11abc	15.03ab	10.71bc	6.25ab
5 WplMm	15.76a	14.90ab	10.90bc	6.52a
6 WplMp	15.50ab	15.96a	13.39a	4.76d
7 WnlMp	14.06abc	14.81ab	11.39b	6.42a
8 WnlMm	14.38abc	14.56ab	11.51b	6.51a
9 WnlMn	12.34cd	13.83bc	11.05bc	5.55bc
平均	13.96	14.45	10.60	5.81

2.4 团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率

由表 5 可以看出,团聚体有机碳贡献率与团聚体有机碳呈现出相似的“Λ”型分布,其中以 250~53 μm 级别团聚体有机碳贡献率为较高,以>2 000 μm 级别团聚体有机碳贡献率较低。虽然>2 000 μm 和 2 000~250 μm 级别团聚体有机碳含量相对较高(表 4),但是贡献率却是以 250~53 μm 级别团聚体最高,这主要是因为大级别团聚体所占比例较少、小级别团聚体所占比例相对较多所致。与对照相比,不同秸秆还田模式增加了直径>2 000 μm 团聚体和 250~53 μm 级别团聚体有机碳的贡献率,但是 2 000~250 μm 和<53 μm 级别团聚体有机碳贡献率,相对于对照均有所下降。这可能是秸秆还田促进了<53 μm 级别团聚体向 250~53 μm 级别团聚体演变以及 2 000~250 μm 团聚体向>2 000 μm 级别团聚体演变的结果。

2.5 不同秸秆还田模式下土壤团聚体中有机碳的氧化稳定性

有机碳的抗氧化能力用氧化稳定系数(K_{os})来

表 5 不同级别水稳性团聚体中有机碳对土壤
有机碳的贡献率(%)

Table 5 Contributing rates of SOC of water stable aggregates in
soil organic carbon(%)

处理 Treatment	大团聚体 Macro-aggregate >2 000 μm	2 000~250 μm	微团聚体 Micro-aggregate 250~53 μm	<53 μm
1 WslMp	12.76	27.00	37.00	19.44
2 WslMm	8.40	25.00	39.00	20.97
3 WslMn	4.83	30.00	39.00	23.17
4 WplMn	5.29	26.00	39.00	24.50
5 WplMm	5.98	28.00	33.00	28.14
6 WplMp	6.31	31.00	38.00	21.09
7 WnlMp	5.84	31.00	33.00	27.99
8 WnlMm	7.35	24.00	33.00	26.25
9 WnlMn	4.85	31.00	30.00	29.88
平均	6.85	28.11	35.67	24.60

衡量, K_{os} 值越大, 氧化稳定性越大, 反之, 则越小。图 2 显示团聚体有机质氧化稳定性以 <53 μm 的最高。图 2A、2B 显示, 与对照(处理 9)相比, 大部分秸秆还田处理提高了 >2 000 μm 和 250~2 000 μm 级别团聚体有机质的氧化稳定性(处理 8 除外)。由图 2C 可以看出, 在 53~250 μm 级别团聚体中, 秸秆还田对有机碳氧化稳定性影响较小, 差异不显著。对于 <53 μm

级别团聚体(图 2D), 多数秸秆还田处理对有机碳的稳定性比对照都有所降低, 其中, 处理 1、2、6 与对照差异达显著水平。可见, 秸秆还田提高了较大团聚体(>2 000 μm 和 250~2 000 μm)有机碳的氧化稳定性。降低了较小团聚体(<53 μm)有机碳的氧化稳定性。在同一小麦秸秆还田模式下, 总体来看, 玉米秸秆粉碎还田有利于较大团聚体氧化稳定性的提高。

2.6 团聚体稳定性与团聚体数量和有机碳之间的关系

由表 6 可知, >2 000 μm 级别团聚体有机碳与 2 000~250 μm 级别团聚体有机碳显著正相关, 2 000~250 μm 级别团聚体有机碳与 250~53 μm 级别团聚体有机碳显著正相关。可见, 较大级别团聚体有机碳与较小级别团聚体有机碳关系密切。可能是因为有机质是团聚体形成的主要黏结介质, 有机分子与粘粒和阳离子相互胶结形成微团聚体, 微团聚体与周围基本粒子或微团聚体之间相互胶结形成大团聚体。GMD 与 250~53 μm 级别团聚体有机碳显著负相关, 说明团聚体稳定性受该级别团聚体影响较显著。

由表 7 可以看出, GMD 与 <53 μm 级别团聚体显著负相关, 250~53 μm 级别团聚体也与 <53 μm 级别团聚体显著负相关。可见, 团聚体的平均几何直径(GMD)与 250~53 μm 团聚体的有机碳含量和 <53 μm 级别团

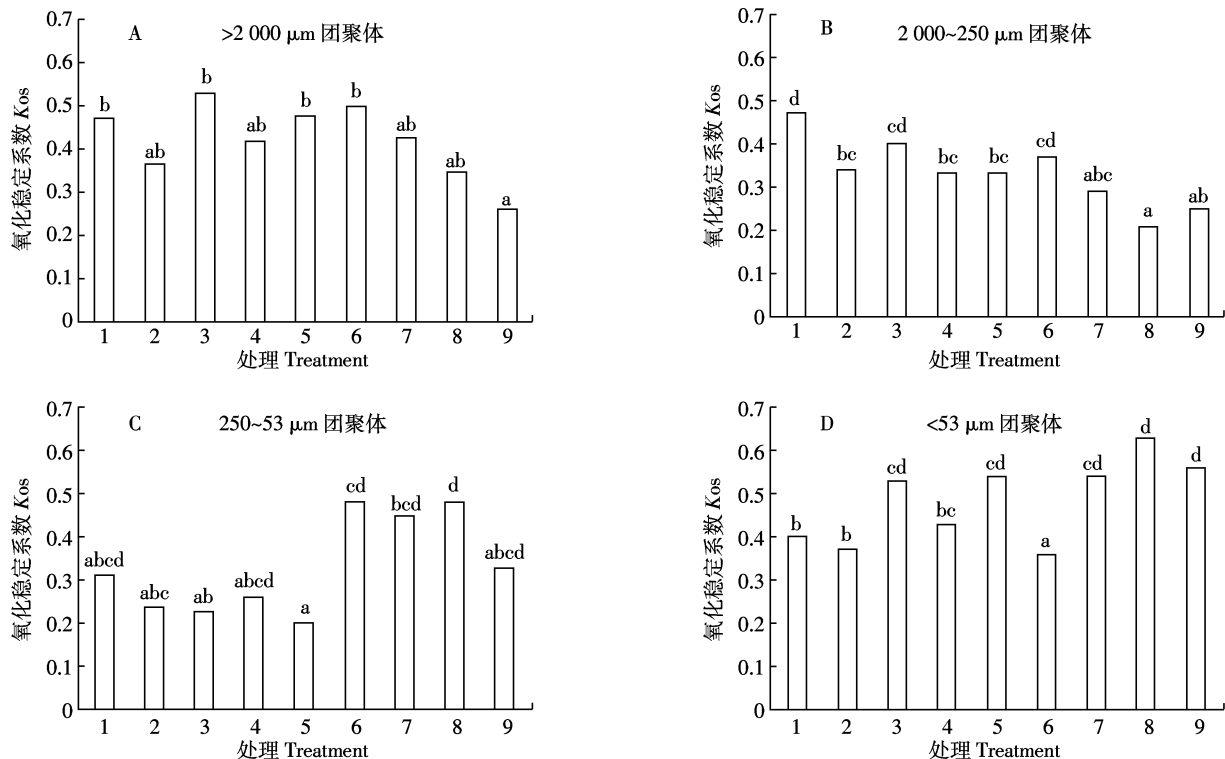


图 2 不同秸秆还田模式下不同粒级团聚体氧化稳定性

Figure 2 The oxidation stability of water stable aggregates different in grades under different straw returning modes

表 6 不同级别团聚体有机碳与团聚体稳定性之间的相关分析

Table 6 Correlation of different aggregate-associated carbon and aggregate stability

团聚体级别	>2 000 μm	2 000~250 μm	250~53 μm	<53 μm	GMD
>2 000 μm	1				
2 000~250 μm	0.717*	1			
250~53 μm	0.581	0.817**	1		
<53 μm	0.344	0.006	0.580	1	
GMD	-0.470	-0.601	-0.730*	-0.338	1

注: * 显著性水平 0.05; ** 显著性水平 0.01, 下同

Note: * stand for significance at <0.05; ** stand for significance at <0.01, the same as follows.

表 7 不同级别团聚体与团聚体稳定性之间的关系

Table 7 Correlation of different level aggregates and aggregate stability

团聚体级别	>2 000 μm	2 000~250 μm	250~53 μm	<53 μm	GMD
>2 000 μm	1				
2 000~250 μm	-0.491	1			
250~53 μm	0.171	-0.550	1		
<53 μm	-0.372	0.401	-0.937**	1	
GMD	0.603	-0.157	0.658	-0.876**	1

聚体数量关系最密切。

3 讨论

3.1 水稳性团聚体分布及其稳定性

秸秆还田增加了土壤有机物料的投入,其转化形成的腐殖质在团聚体形成过程中作为重要的胶结物质有利于大团聚体的形成^[5],能够显著增加土壤中大团聚体的含量及其稳定性^[6]。同时秸秆腐解过程中释放养分,促进了作物根系的生长,从而通过根系增加了新鲜有机物质的输入,作物根系代谢产物使得土壤中较小的颗粒胶结成大的水稳性团聚体^[7]。本试验结果也表明,秸秆还田有利于大团聚体(>2 000 μm)和中微团聚体(250~53 μm)含量的增加,减小<53 μm 级别团聚体含量。不同还田模式对团聚体影响有差异,整体表现为粉碎秸秆还田对大团聚体有增加效果;在有小麦秸秆还田条件下,玉米秸秆粉碎覆盖还田没有提高团聚体稳定性,这与 Spaccini R 等^[18]结果一致。秸秆粉碎旋耕直接还田或覆盖深松还田,一方面秸秆与土壤颗粒接触的程度不同,另外,土壤结构的扰动程度也不同,均影响到两种还田方式的效果。赵红和吕贻忠^[19]认为

覆盖还田改善田间土壤结构,立秆还田能提高微团聚体的稳定性,粉碎还田通过增加土壤有机碳含量而增加水稳性大团聚体的含量。王珍和冯浩^[20]报道不同粉碎程度及 C/N 的秸秆还田后对土壤结构影响差异显著,长秸秆加入土壤对土壤团聚结构影响较小。可见玉米秸秆粉碎还田更有利于大团聚体的维持。

3.2 不同级别团聚体有机碳及其氧化稳定性

不同秸秆还田模式下,土壤有机碳的增加主要体现在大团聚体碳上,这可能是有机质作为团聚体形成的主要胶结物质,通过其胶结作用将土壤颗粒和小级别团聚体胶结成大团聚体^[21],因而大团聚体有机碳含量相对较多,相关分析(表 7)也说明了这一点。很多研究表明^[22-23],长期的化肥配施有机肥可增加各级团聚体有机碳的含量,特别是显著增加了水稳性大团聚体(>2 mm 和 0.25~2 mm)有机碳的含量^[4]。这与我们的研究结果一致。本研究发现,在小麦秸秆粉碎旋耕直接还田条件下,玉米秸秆粉碎旋耕直接还田更有利于大级别团聚体(>250 μm)中有机碳的增加;在小麦秸秆不还田情况下,玉米秸秆粉碎旋耕直接还田或覆盖深松还田则有利于小级别团聚体中有机碳的提高。总体来看,2 000~250 μm 级别团聚体有机碳氧化稳定性较低,这与植物枯枝落叶的新鲜有机碳先在大团聚体中固持有关^[24],<53 μm 级别团聚体有机碳稳定性较高,这一方面与有机碳与土壤矿物质复合后提高了有机碳的稳定有关,另一方面也说明,与土壤小颗粒结合的有机质主要是比较稳定的大分子腐殖物质^[25],秸秆还田对大团聚体(>250 μm)氧化稳定性有提高的作用,而对较小级别团聚体有机质氧化稳定性有降低作用。这与来源于秸秆残体的多糖、纤维素,半纤维素等有机物质或新形成的腐殖物质在团聚体形成中的参与有关,既可以适当提高大团聚体中有机碳稳定性,使得大团聚体得以更好的保持,又能适当降低小团聚体中有机碳的稳定性,提高其在肥力方面的调控能力。

4 结论

秸秆还田有利于土壤团聚体有机碳的增加,尤其表现在较大级别团聚体有机碳方面。不同秸秆还田模式对团聚体有机碳影响有差异,其中秸秆粉碎旋耕直接还田更利于土壤团聚体有机碳的增加。短期内秸秆还田对团聚体稳定性影响不大。秸秆还田有利于较大级别团聚体氧化稳定性的提高,对小级别团聚体氧化稳定性有降低作用。

参考文献:

- [1] 杨长明, 欧阳竹. 华北平原农业土地利用方式对土壤水稳性团聚体分布特征及其有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2008, 40(1): 100-105.
YANG Chang-ming, OUYANG Zhu. Effects of agricultural land uses on water-stable aggregate distribution and organic carbon in farmland soil in the Northern China Plain[J]. *Soil*, 2008, 40(1): 100-105.
- [2] 王彩霞, 刘 帅, 王 勇, 等. 不同保护性耕作方式对微团聚体有机碳氧化稳定性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 149-155.
WANG Cai-xia, LIU Shuai, WANG Yong, et al. Effect of different conservational tillage modes on the oxidation stability of soil organic carbon in soil micro-aggregates[J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2010, 38(5): 149-155.
- [3] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1841-1848.
SUN Tian-cong, LI Shi-qing, SHAO Ming-an. Effects of long-term fertilization on distribution of organic matters and nitrogen in cinnamon soil aggregates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(9): 1841-1848.
- [4] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1035-1041.
LIU En-ke, ZHAO Bing-qiang, MEI Xu-rong, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 1035-1041.
- [5] 王彩霞, 王旭东, 朱瑞祥. 保护性耕作对土壤结构体有机碳氧化稳定性的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5): 121-126.
WANG Cai-xia, WANG Xu-dong, ZHU Rui-xiang. Effect of conservational tillage measures on the oxidation stability of soil organic carbon in soil aggregates[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(5): 121-126.
- [6] 徐华君. 阿尔泰山区土壤有机碳氧化稳定性的初步比较分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 27-30.
XU Hua-jun. Comparative analysis of the soil organic carbon oxidation stability in Altai mountain, Xinjiang[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(6): 27-30.
- [7] 袁可能. 土壤有机矿质复合体研究 I. 土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性的初步研究[J]. 土壤学报, 1963, 11(3): 286-292.
YUAN Ke-neng. Soil organic mineral complex I. Soil organic mineral complex in a preliminary study of oxidative stability of humus [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1963, 11(3): 286-292.
- [8] 张付申. 不同施肥处理对壤土和黄绵土有机质氧化稳定性研究[J]. 河南农业大学学报, 1996, 30(1): 80-84.
ZHANG Fu-shen. Effects of different application of fertilizer to loess soil and yellow loamy soil on the oxidable stability of soil [J]. *Acta Agricultural University Henanensis*, 1996, 30(1): 80-84.
- [9] 韩志卿, 张电学, 王介元, 等. 长期施肥对土壤有机质氧化稳定性动态变化及其与肥力关系的影响 [J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(3): 31-35.
HAN Zhi-qing, ZHANG Dian-xue, WANG Jie-yuan, et al. The effect of long-term fertilization on the relationship between dynamic changes of oxidation stability of soil organic matter and soil fertility [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2000, 23(3): 31-35.
- [10] 谭文峰, 朱志峰, 刘 凡, 等. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点[J]. 自然资源学报, 2006, 21(6): 973-980.
TAN Wen-feng, ZHU Zhi-feng, LIU Fan, et al. Organic carbon distribution and storage of soil aggregates under land use change in Jianghan Plain, Hubei Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(6): 973-980.
- [11] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 702-709.
XIE Jin-sheng, YANG Yu-sheng, CHEN Guan-shui, et al. Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 702-709.
- [12] 戴 珏, 胡君利, 林先贵, 等. 免耕对潮土不同粒级团聚体有机碳含量及微生物碳代谢活性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 923-930.
DAI Yu, HU Jun-li, LIN Xian-gui, et al. Effects of non-tillage on content of organic carbon and microbial carbon metabolism of soil aggregates in a fluvo-aquic soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 923-930.
- [13] 唐海明, 汤文光, 肖小平, 等. 中国农田固碳减排发展现状及其战略对策[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1755-1759.
TANG Hai-ming, TANG Wen-guang, XIAO Xiao-ping, et al. Current situation and countermeasures of China's C sequestration and mitigation [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2010, 19(7): 1755-1759.
- [14] Elliot E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1986, 50: 518-524.
- [15] 蔡立群, 齐 鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦-豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 141-145.
CAI Li-qun, QI Peng, ZHANG Ren-zhi. Effects of conservation tillage measures on soil aggregates stability and soil organic carbon in two-sequence rotation system with spring wheat and field pea [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 141-145.
- [16] 霍 琳, 武天云, 蔺海明, 等. 长期施肥对黄土高原旱地黑垆土水稳性团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 545-550.
HUO Lin, WU Tian-yun, LIN Hai-ming, et al. Effects of long-term fertilization on water-stable aggregates in calcic kastanozem of loess plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 545-550.
- [17] 周 萍, 潘根兴. 长期不同施肥对黄泥土水稳性团聚体颗粒态有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 256-261.
ZHOU Ping, PAN Gen-xing. Effect of different long-term fertilization treatments on particulate organic carbon in water-stable aggregates of paddy soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 256-261.
- [18] Spaccini R, Piccolo A, Haberhauer G, et al. Decomposition of maize straw in three European soils as revealed by DRIFT spectra of soil particle fractions [J]. *Geoderma*, 2001, 99: 245-260.
- [19] 赵 红, 吕贻忠. 保护性耕作对潮土结构特性的影响 [J]. 生态环境

- 学报, 2009, 18(5):1956–1960.
- ZHAO Hong, LU Yi-zhong. The effect of conservation tillage on the structural characteristics of Fluvo-aquic soil [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2009, 18(5):1956–1960.
- [20] 王 珍, 冯 浩. 秸秆不同还田方式对土壤结构及土壤蒸发特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6):224–228.
- WANG Zhen, FENG Hao. Study on the influence of different straw-returning manners on the soil structure and characters of soil water evaporation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(6):224–228.
- [21] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:2099–2103.
- [22] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3):422–429.
- LI Hui-xin, Yuan Ying-hong, Huang Qian-ru, et al. Effects of long-term fertilization on labile organic carbon in soil aggregates in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3):422–429.
- [23] Bronick C J, Lal R. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in Northeastern Ohio, USA[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81:239–252.
- [24] Bravo-Garza M R, Voroney P, Bryan R B. Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of ^{14}C -labeled maize residues and wetting and drying cycles in vertisols [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42:953–959.
- [25] Liao J D, Boutton T W, Jastrow J D. Organic matter turnover in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland: Evidence from natural ^{13}C and ^{15}N [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38:3197–3210.